

# Stratégie de co-conception pour les systèmes d'optique adaptative : application à l'optimisation des longueurs d'onde pour l'observation de satellites

Florian CHEYSSIAL<sup>1</sup> Laurent M. MUGNIER<sup>1</sup> Cyril PETIT<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DOTA, ONERA, Université Paris Saclay, BP 72, 92322 Châtillon cedex, France

**Résumé** – L'optique adaptative est utilisée pour atténuer les effets de la turbulence atmosphérique sur les systèmes d'imagerie, mais la correction n'est que partielle et la déconvolution est souvent nécessaire pour améliorer la résolution. Il en résulte des systèmes complets opto-numériques, qui sont traditionnellement conçus de manière séquentielle, *i.e.* le système d'optique adaptative est optimisé dans un premier temps et les algorithmes de restauration dans un second. Des études sur les systèmes opto-numériques ont montré qu'optimiser conjointement l'ensemble du système était une meilleure alternative. Nous proposons d'étendre ces stratégies de co-conception à la conception d'un système d'imagerie assisté par optique adaptative. Nous dérivons un critère simple qui prend en compte les propriétés de la source et la performance de l'ensemble du système opto-numérique. Afin d'illustrer son intérêt, nous l'utilisons pour optimiser la répartition du flux entre l'analyseur de front d'onde et la caméra d'imagerie. Par la suite, n'importe quel paramètre du système opto-numérique, et même le système complet, pourrait être optimisé de cette manière.

**Abstract** – Adaptive optics is used to mitigate the effects of atmospheric turbulence on imaging systems, but the correction is only partial and deconvolution is often required to improve the resolution. This results in entire optical/digital systems, which are traditionally designed sequentially, *i.e.* the adaptive optics system is optimised first, and the restoration algorithms are designed in a second step. Studies on optical/digital systems have shown that jointly optimising the whole system is a better alternative. We propose to extend these co-design strategies to the design of an adaptive optics assisted imaging system. We derive a simple criterion that takes into account the source properties and the entire optical/digital system performance. To illustrate its interest, we use it to optimise the flux distribution between the wavefront sensor and the imaging camera. Later, any parameter of the optical/digital system, if not the entire system itself, could be optimised this way.

## 1 Introduction

L'observation de l'espace depuis le sol est limitée par la turbulence atmosphérique qui déforme les fronts d'ondes incidents sur les télescopes au sol et diminue fortement leur résolution. Ces déformations aléatoires peuvent être en grande partie compensées par des systèmes d'optique adaptative (OA). Cependant, la correction apportée par ces systèmes est partielle, et il est nécessaire d'utiliser des algorithmes de restauration d'image pour atteindre la meilleure résolution possible [1].

Traditionnellement, ces systèmes opto-numériques sont conçus en deux étapes. Dans un premier temps, le système optique – qui inclut le télescope, le système d'OA et le capteur – est optimisé afin de maximiser la qualité des images dans le plan focal du télescope. Cela revient à optimiser la fonction d'étalement du point (FEP) du système dont la qualité peut être quantifiée à l'aide de critères comme le rapport de Strehl, l'erreur résiduelle de front d'onde ou l'intensité maximale de la FEP [2, 3]. Puis, dans un second temps, des algorithmes de restauration sont utilisés (ou développés) pour compenser les défauts restants dans les images plan focal. Toutefois, cette méthode de conception séquentielle est sous-optimale puisqu'en faisant ainsi, l'optimisation du système optique ne tient pas compte des algorithmes de restauration utilisés ensuite. En outre, les critères fondés sur la FEP sont quelque peu arbitraires puisque, *in fine*, on cherche à optimiser la qualité des images restaurées, et non celle des images plan focal. Afin de pallier ces limites, il est préférable d'optimiser conjointement

le système optique et les algorithmes de restauration vis-à-vis de critères fondés sur la qualité des images restaurées. On parle alors de conception conjointe optique/traitement ou de « co-conception ».

Cathey & Dowski sont les premiers à avoir mis en place une approche par co-conception dans le but d'optimiser un masque de phase qui permet d'augmenter de la profondeur de champ d'un système optique [4], mais leur méthode ne prend pas explicitement en compte le processus de restauration. Une méthodologie de co-conception plus générale, fondée sur la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (EQM) entre la scène réelle et les images restaurées, a été proposée par Stork & Robinson [5, 6]. Leur approche, en plus de faire explicitement intervenir la restauration d'image, permet de prendre en compte les propriétés statistiques de l'objet.

Dans cette communication, nous proposons d'appliquer la méthodologie proposée par Stork & Robinson à la conception d'un système optique assisté par optique adaptative. En particulier, nous nous concentrerons sur l'optimisation de la répartition du flux entre le capteur d'imagerie et l'analyseur de surface d'onde (ASO, qui mesure les aberrations turbulentes à corriger) dans le cadre de l'imagerie de satellites. Pour débiter, nous décrivons Sec. 2 la méthodologie employée. Ensuite, Sec. 3, nous présentons les résultats obtenus pour une voie d'imagerie utilisant une unique bande spectrale et un ASO prenant le flux restant dans une plage de longueurs d'onde fixée. Nous optimisons d'abord la longueur d'onde centrale d'imagerie seule, puis nous ajoutons la largeur de bande aux variables.

Pour finir, nous concluons sur nos résultats et plus généralement sur l'intérêt d'utiliser une approche par co-conception pour les systèmes assistés par OA.

## 2 Méthodologie

Cette section décrit la méthodologie qui est utilisée et qui permet d'optimiser n'importe quel paramètre de l'ensemble du système opto-numérique vis-à-vis des images restaurées. Cela nécessite : un modèle du système optique, et en particulier de sa fonction de transfert optique (FTO), permettant de simuler des images ; une méthode de reconstruction capable de restaurer les images simulées ; et une métrique pouvant quantifier la qualité des images restaurées.

### 2.1 Critère de qualité d'image

Le choix du critère d'optimisation dépend en premier lieu de l'objectif visé. Pour des applications d'imagerie, l'objectif est d'obtenir des images restaurées qui soient les plus proches possible des scènes observées. De plus, on souhaite que le critère rende compte des performances du système en moyenne. Ainsi, les critères qui prennent la forme d'une distance, calculée en moyenne sur les objets et réalisations de bruit possibles, entre l'objet réel  $\mathbf{o}$  et son estimée  $\hat{\mathbf{o}}(\mathbf{i})$ , où  $\mathbf{i}$  est l'image plan focal, sont particulièrement pertinents. Parmi les différentes possibilités, nous optons pour l'erreur quadratique moyenne (EQM) qui est la métrique la plus largement utilisée pour l'évaluation de la qualité d'images :

$$\text{EQM}(\hat{\mathbf{o}}) = \mathbb{E}_{\mathbf{o}, \mathbf{i}} [\|\hat{\mathbf{o}}(\mathbf{i}) - \mathbf{o}\|^2], \quad (1)$$

avec  $\|\cdot\|$  la norme euclidienne et  $\mathbb{E}_{\mathbf{o}, \mathbf{i}}$  l'espérance mathématique prise en moyenne sur les différents objets possibles et les réalisations d'images (donc de bruit).

Utiliser l'EQM plutôt qu'une autre distance moyenne présente deux principaux avantages. Premièrement, grâce au théorème de Parseval, l'EQM peut être exprimée dans le domaine direct comme dans le domaine de Fourier, ce qui permet une analyse fréquentielle de l'erreur et donc une meilleure compréhension des résultats. Deuxièmement, si  $\hat{\mathbf{o}}$  est l'estimateur LMMSE, pour *linear minimum mean square error*, l'EQM peut être calculée analytiquement. Cela réduit considérablement le temps de calcul lors de l'optimisation puisque cela permet d'éviter la simulation de nombreuses images restaurées servant à moyenner l'erreur.

### 2.2 Modèle d'imagerie

L'image discrète  $\mathbf{i}$  d'un objet continu  $o$  obtenue dans le plan focal d'un télescope peut être décrite par la formule suivante :

$$\mathbf{i} = [h_{det} * h_{opt} * o]_{\sqcup} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

où  $h_{det}$  est la FEP du détecteur,  $h_{opt}$  est la FEP optique corrigée par OA du télescope, et  $\mathbf{n}$  est un bruit additif, supposé indépendant de l'objet. On suppose que le champ de l'image est inclus dans le domaine isoplanétique, *i.e.* que la FEP corrigée ne varie pas dans le champ de vue. Les symboles  $*$  et  $\sqcup$  représentent respectivement le produit de convolution et l'opérateur de discrétisation. Cette relation peut être approximée

par une convolution discrète :

$$\mathbf{i} = \mathbf{h} * \mathbf{o} + \mathbf{n}, \quad (3)$$

avec  $\mathbf{o}$  la décomposition de  $o$  sur une base discrète, par ex. des sinus cardinaux, et  $\mathbf{h}$  une version discrète de  $h_{det} * h_{opt}$  qui dépend de la base choisie pour  $\mathbf{o}$ . La FEP corrigée  $h_{opt}$  peut se décomposer comme le produit de convolution entre une FEP dite statique, qui tient compte de la diffraction et des aberrations statiques du télescope, et une FEP dite turbulente qui traduit l'impact de la phase résiduelle après correction partielle par OA [7, 1] :

$$h_{opt} = h_{static} * h_{ao}. \quad (4)$$

Pour simuler numériquement ces FEP corrigées, nous utilisons une simulation dite *Fourier-based*. Ces simulations, décrites en détail dans [8], utilisent des formules analytiques fondées sur la physique ce qui les rend beaucoup plus rapides que les simulations de bout en bout. Ce gain de temps est particulièrement intéressant puisqu'il est nécessaire de simuler de nombreuses FEP lors de l'optimisation.

### 2.3 Modèle d'objet et de bruit

Afin de décrire les objets possibles, on utilise une distribution *a priori* gaussienne et stationnaire définie par sa moyenne  $\bar{\mathbf{o}}$  et sa densité spectrale de puissance (DSP)  $S_o$ . On modélise  $\bar{\mathbf{o}}$  par une constante dont la valeur est le flux moyen de l'objet :  $N_{ph}/N_{pix}$ , avec  $N_{ph}$  le nombre de photons dans l'image et  $N_{pix}$  le nombre de pixels du capteur. Pour représenter la DSP, on utilise une écriture légèrement modifiée du modèle de Mattern qui fonctionne bien pour des images de scènes naturelles [9, 10] :

$$S_o(f) = \frac{A^2}{k + f^p}, \quad (5)$$

où  $f = |f|$  correspond à la fréquence spatiale radiale. Dans ce modèle,  $A$  donne le niveau global de la DSP,  $p$  décrit sa décroissance à hautes fréquences et  $k$  fixe sa hauteur pour les très basses fréquences. Pour des images de satellites,  $p$  vaut généralement entre 2 et 2.5 tandis que  $k$  dépend de leur taille. Concernant  $A$ , une valeur empirique qui fonctionne bien est  $A = N_{ph}$ .

Le terme de bruit  $\mathbf{n}$  peut contenir du bruit de photon et de lecture. Sous hypothèse de fort flux, il peut être bien approximé par un bruit gaussien inhomogène et indépendant. Par la suite, on approximera le bruit comme homogène, dominé par le bruit de photons, de telle sorte qu'il a une DSP  $S_n$  constante de valeur  $N_{ph}$ .

### 2.4 Restauration d'images

Afin de restaurer les images obtenues dans le plan focal du télescope, on utilise l'estimateur MMSE, pour *minimum mean square error*, puisqu'il minimise l'EQM que l'on a choisie comme critère d'optimisation. Pour une distribution de bruit et un *a priori* sur l'objet gaussiens, on peut montrer que l'estimateur MMSE est égal à sa forme linéaire, le LMMSE, ce qui permet de calculer analytiquement l'EQM. De plus, si l'on suppose l'objet périodique, alors son estimée MMSE est égale

à l'objet filtré par un filtre de Wiener dans l'espace de Fourier discret :

$$\tilde{\hat{o}}_{mmse}(f_j) = \frac{S_o(f_j)\tilde{h}^*(f_j)\tilde{v}(f_j) + S_n(f_j)\tilde{\bar{o}}(f_j)}{S_o(f_j)|\tilde{h}(f_j)|^2 + S_n(f_j)}, \quad (6)$$

où le tilde exprime la transformée de Fourier discrète et les fréquences  $f_j$  sont les valeurs conjuguées des positions des pixels, en radians, dans l'espace de Fourier.

En injectant l'expression de  $\hat{o}_{mmse}$  (Eq. 6) dans l'équation 1, on obtient la formule analytique suivante :

$$\text{EQM}(\hat{o}_{mmse}, \mathbf{o}) = \frac{1}{N_{pix}} \sum_{j=0}^{N_{pix}-1} \frac{S_n(f_j)}{|\tilde{h}(f_j)|^2 + \frac{S_n(f_j)}{S_o(f_j)}}. \quad (7)$$

Dans cette expression, on observe qu'à fort rapport signal à bruit (RSB), avec  $\text{RSB} = S_o/S_n$ , l'EQM est donné par l'amplification du bruit par le filtrage inverse :  $S_n/|\tilde{h}|^2$ . À l'inverse, à faible RSB,  $\hat{o}_{mmse} = \bar{o}$  et l'EQM vaut  $S_o$ . En pratique, afin d'obtenir une erreur relative qui puisse être comparée pour des objets de flux différents, on calcule ce que l'on appelle l'EQM relatif (EQMR) défini comme  $\text{EQM}/N_{ph}^2$ .

### 3 Optimisation de la répartition du flux

Afin d'illustrer l'intérêt de l'approche par co-conception présentée ci-dessus, on s'intéresse à l'optimisation de la répartition du flux collecté par le télescope entre la voie dite scientifique, qui acquiert les images scientifiques, et la voie ASO où sont mesurées les déformations du front d'onde incident. Dans le cas d'observations astronomiques, cette répartition est souvent fixée par des objectifs scientifiques ou par des contraintes sur le spectre du signal astrophysique reçu. Pour faire de l'observation de satellites, à supposer qu'aucune signature spectrale n'est recherchée, la répartition du flux peut être choisie librement dans les bandes spectrales visible et proche-IR où les satellites émettent avec un spectre proche de celui du soleil.

Nous supposons ci-dessous un cas simple de répartition où la voie d'imagerie utilise tout le flux contenu dans une bande spectrale de longueur d'onde centrale  $\lambda_{ima}$  et de largeur  $\Delta_\lambda$ . L'ASO, quant à lui, prend tout le flux restant sur une plage donnée que l'on fixera à [400 nm ; 1000 nm] pour nos simulations. Les designs du télescope et du banc d'OA sont calqués sur ceux d'un système existant, ODISSEE [11], qui est monté sur le télescope Méo à l'Observatoire de Haute Provence (OHP). En particulier, ce système possède une fréquence de correction de 1,5kHz, un ASO de type Shack-Hartmann avec 8x8 sous-pupilles et un miroir déformable de 9x9 actionneurs. Le télescope fait 1,5m de diamètre et possède une occultation centrale de 30%.

#### 3.1 Optimisation de la longueur d'onde centrale d'imagerie $\lambda_{ima}$

Dans un premier temps, on s'intéresse à l'optimisation de la longueur d'onde centrale d'imagerie seule. On suppose que cette dernière peut varier librement entre 450 nm et 1450 nm, et on fixe la largeur de bande à  $\Delta_\lambda = 50\text{nm}$  ce qui est assez large pour avoir assez de flux tout en étant assez fin pour supposer que la FEP de la bande est égale à la FEP à  $\lambda_{ima}$ .

Pour nos simulations, nous avons fait fi des technologies de capteur existantes et avons considéré une efficacité quantique constante pour toutes les longueurs d'ondes afin d'observer l'effet seul de  $\lambda_{ima}$  sur l'EQM. Dans le cadre d'une étude système plus poussée, les efficacités quantiques de capteurs réels peuvent être prises en compte, ce qui pourrait modifier la valeur de l'optimum obtenu.

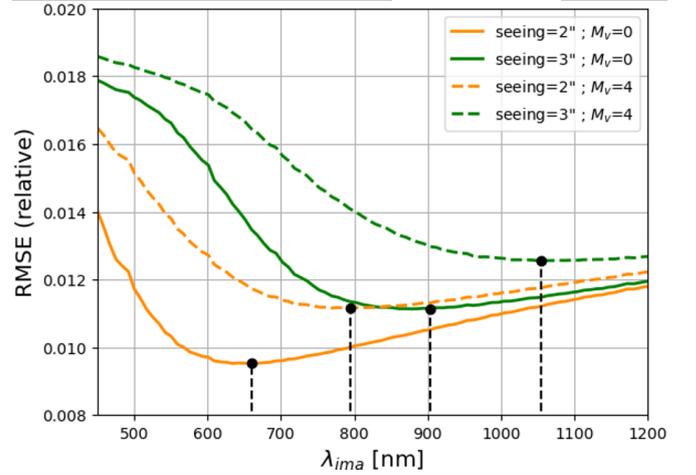


FIGURE 1 : Erreur moyenne en fonction de  $\lambda_{ima}$  ( $p=2$ ).

On présente Fig. 1 la racine carré de l'EQMR en fonction de la longueur d'onde d'imagerie. Les résultats sont donnés, d'une part, pour deux conditions de turbulence, à savoir  $seeing=2''$  (courbes jaunes) et  $seeing=3''$  (courbes vertes), où le  $seeing$  est la résolution angulaire en présence de turbulence ; puis d'autre part pour deux flux objet, à savoir  $M_v=0$  (traits pleins) et  $M_v=4$  (traits pointillés), où la magnitude  $M_v$  est une unité photométrique inversement proportionnelle au logarithme du flux reçu. On peut déjà remarquer que, pour chacune des conditions ( $seeing$  et magnitude), il existe un unique optimum correspondant au minimum de la courbe associée, ici marqué par un point noir. Pour des longueurs d'ondes plus grandes que l'optimum, l'erreur croît du fait de la diffraction qui limite la résolution de la FEP. Pour des longueurs d'onde plus courtes que l'optimum, l'EQMR croît de manière encore plus significative à cause de l'erreur résiduelle de front d'onde qui, une fois convertie en erreur de phase, est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. La longueur d'onde optimale obtenue pour chaque courbe correspond donc au meilleur compromis entre l'erreur due à la diffraction et l'erreur résiduelle de front d'onde. Lorsque la turbulence s'intensifie, *i.e.* lorsque le  $seeing$  augmente, à magnitude objet constante, on observe que l'erreur augmente pour toutes les longueurs d'onde et que la longueur d'onde optimale augmente aussi. Cela est dû au fait que l'erreur résiduelle de front d'onde croît avec le  $seeing$ , alors que l'erreur due à la diffraction reste inchangée. De même, lorsque la magnitude augmente, *i.e.* lorsque le flux reçu diminue, à  $seeing$  constant, l'erreur croît pour toutes les longueurs d'onde et l'optimum se décale vers une plus grande longueur d'onde.

À titre de comparaison, l'optimisation de la longueur d'onde d'imagerie avait déjà été étudiée par Tyler [12], puis par Rao et Jiang [13], en utilisant des critères d'optimisation traditionnels fondés sur la FEP. Dans ces deux études, on retrouve des tendances similaires aux nôtres, excepté sur l'influence qu'a la magnitude de l'objet sur l'optimum puisque, intrinsèquement,

les critères fondés sur la FEP ne tiennent pas compte de la DSP de l'objet, ni de son flux. De plus, en appliquant leurs critères à notre système, ODISSEE, on obtient des longueurs d'ondes optimales beaucoup plus grandes pour les mêmes conditions : environ 1150 nm pour un *seeing* de 2" par exemple. Or après déconvolution, ces longueurs d'ondes plus élevées conduisent à des images notablement sous-optimales.

### 3.2 Optimisation conjointe de $\Delta_\lambda$ et $\lambda_{ima}$

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'optimisation conjointe de la longueur d'onde centrale d'imagerie et de la largeur de bande associée. Pour cette étude, nous avons considéré que les voies scientifique et ASO se partageaient le flux entre 400 nm et 1000 nm. Pour des largeurs de bande  $\Delta_\lambda$  supérieures à 50 nm, la FEP est calculée comme la moyenne de plusieurs FEP à des longueurs d'onde séparées par moins de 50 nm.

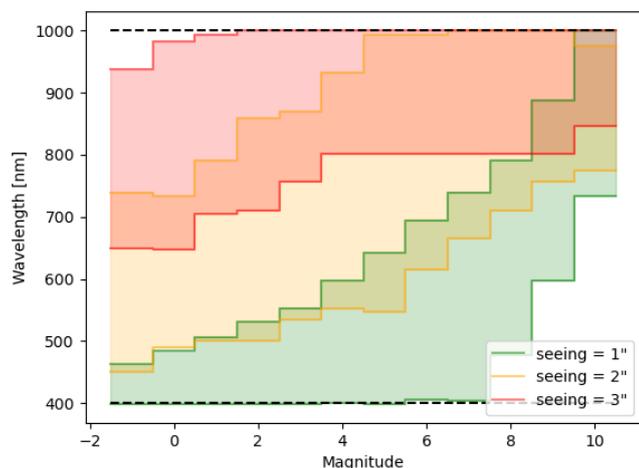


FIGURE 2 : Bande spectrale d'imagerie optimale en fonction du *seeing* et de la magnitude objet  $M_v$  ( $p=2$ ).

La Fig. 2 présente les bandes spectrales optimales pour la voie scientifique en fonction de la magnitude (en abscisse) et pour trois valeurs de *seeings* : 1", 2" et 3" (respectivement en vert, jaune et rouge). On observe la même tendance que dans la sous-section précédente, *i.e.* les longueurs d'ondes d'imagerie optimales tendent à croître quand la magnitude et/ou le *seeing* augmente. Pour un *seeing* de 2" ou 3", on remarque que la largeur de bande reste à peu près constante, excepté lorsque la magnitude est très élevée ( $\geq 9$ ), auquel cas la voie scientifique doit céder des photons à l'ASO qui passe dans un régime limité par le flux. Pour un *seeing* de 1", on observe que la largeur de bande diminue aussi pour les faibles magnitudes. À faibles magnitude et *seeing* (objet brillant et turbulence assez faible), le RSB est très élevé quelle que soit la largeur de bande, et les FEP corrigées sont à la limite de diffraction. Ainsi, l'optimisation converge vers une bande étroite et à très courtes longueurs d'onde, celles pour lesquelles la résolution sera la meilleure, quand bien même cela aurait augmenté le RSB d'avoir une bande d'imagerie plus large.

## 4 Conclusion

Dans cette étude, nous avons montré comment appliquer une démarche de co-conception au design d'un télescope assisté

par OA, et avons illustré l'intérêt d'une telle démarche en optimisant la répartition du flux entre les voies ASO et scientifique. Le critère d'optimisation est simple à calculer et permet de tenir compte de l'ensemble du système opto-numérique, ainsi que des propriétés des objets observés. Cela nous a permis de voir que le choix optimal pour les longueurs d'onde d'imagerie dépendait non seulement du *seeing*, comme cela avait déjà été montré auparavant, mais aussi du flux reçu par le télescope, ce qu'il n'est pas possible de constater en utilisant des critères fondés sur la FEP. Au regard de ces résultats, deux stratégies peuvent être adoptées : faire un système dont les longueurs d'onde d'imagerie peuvent être ajustées de manière dynamique, ou bien chercher le meilleur système (fixe) en moyenne sur une plage de conditions données.

Ce travail présente plusieurs perspectives. Tout d'abord, l'optimisation de la répartition du flux pourrait être étudiée dans le cas de l'imagerie multi-spectrale, ce qui permettrait de faire un système fixe et robuste aux variations de turbulence et de flux reçu.

Il serait aussi intéressant d'optimiser d'autres paramètres du système d'OA tels que la fréquence de boucle ou bien le nombre de sous-pupilles de l'ASO Shack-Hartmann. Enfin, le critère utilisé ici suppose implicitement la FEP connue pour la déconvolution, ce qui n'est pas tout à fait vrai en pratique. Il serait donc pertinent de regarder l'influence de l'incertitude sur la FEP sur nos résultats.

## Références

- [1] J.-M. Conan. *Étude de la Correction Partielle en Optique Adaptative*. These de doctorat, Paris 11, 1994.
- [2] B. Neichel et al. The adaptive optics modes for HARMONI : from Classical to Laser Assisted Tomographic AO. In Enrico Marchetti, Laird M. Close, and Jean-Pierre Véran, editors, *Adaptive Optics Systems V*, volume 9909, page 990909. SPIE, 2016.
- [3] G. Rousset et al. Design of the Nasmyth adaptive optics system (NAOS) of the VLT. In D. Bonaccini and R. K. Tyson, editors, *Adaptive Optical System Technologies*, volume 3353, pages 508 – 516. SPIE, 1998.
- [4] W. T. Cathey and E. R. Dowski. New paradigm for imaging systems. *Appl. Opt.*, AO, 41(29) :6080–6092, 2002.
- [5] D. G. Stork and M. D. Robinson. Information-based methods for optics/image processing co-design. *AIP Conference Proceedings*, 860(1) :125–135, 2006.
- [6] D. G. Stork and M. D. Robinson. Theoretical foundations for joint digital-optical analysis of electro-optical imaging systems. *Appl. Opt.*, AO, 47(10) :B64–B75, April 2008.
- [7] F. Roddier. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy. *Progress in Optics*, 19 :281–376, 1981.
- [8] L. Jolissaint, J.-P. Véran, and R. Conan. Analytical modeling of adaptive optics : Foundations of the phase spatial power spectrum approach. *J. Opt. Soc. Am. A*, JOSAA, 23(2) :382–394, 2006.
- [9] A. Yan, L. M. Mugnier, J.-F. Giovannelli, R. Fétick, and C. Petit. Marginalized myopic deconvolution of adaptive optics corrected images using Markov chain Monte Carlo methods. *JATIS*, 9(4) :048004, 2023.
- [10] A. P. Kattinig and J. Primot. Model of the second-order statistic of the radiance field of natural scenes, adapted to system conceiving. In *Visual Information Processing VI*, volume 3074, pages 132–141. SPIE, 1997.
- [11] C. Petit et al. LEO satellite imaging with adaptive optics and marginalized blind deconvolution. In *21st AMOS Conference*, USA, 2020.
- [12] D. W. Tyler and J. S. Fender. Optimal wavelength selection for adaptive optics telescopes. In *Adaptive Optics in Astronomy*, volume 2201, pages 227–238. SPIE, 1994.
- [13] C. Rao and W. Jiang. Optimum imaging observation wavelength selection for astronomical telescopes with partial correction adaptive optics. *Astronomy & Astrophysics*, 390(2) :801–807, 2002.